

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-361

November 2002

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:



*Dietrich Hoppe, Jürgen Fietz, Cornelius Zippe,
Dieter Koch**

Röntgen-Tomographie mit Hilfe einer Elektronenstrahl-Schweißanlage

Herausgeber:
Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE



FZR-361

November 2002

*Dietrich Hoppe, Jürgen Fietz, Cornelius Zippe,
Dieter Koch**

Röntgen-Tomographie mit Hilfe einer Elektronenstrahl-Schweißanlage

*Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)

Kurzfassung

Eine vorhandene Elektronenstrahl-Schweißanlage soll mit geringstem technischen Zusatzaufwand zur Röntgen-Tomographie eingesetzt werden. Im Vakuum der Schweißanlage werden dafür neben einer geeigneten Anode für den Elektronenstrahl nur eine einfache Vorrichtung zum Drehen des Untersuchungsobjektes und insbesondere nur ein einziger Detektor für die Röntgenstrahlung untergebracht. Die zur tomographischen Bildrekonstruktion benötigte Information soll allein aus der Messgröße dieses Detektors gewonnen werden.

Abstract

An existing electron beam welding box should be used with the least additional effort for X-ray tomography. Only a suitable anode, a simple device to turn the investigated object and one detector for X-rays are placed into the vacuum of the welding box. The information necessary to reconstruct tomograms should be derived only from the measurand of the detector.

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	3
2 Die Messanordnung	4
3 Probleme aufgrund eingeschränkter messtechnischer Bedingungen	5
4 Tomographische Bildrekonstruktion	10
4.1 Untersuchungsobjekt 1: Körper aus Aluminium	10
4.1.1 Kontinuierliche Strahlablenkung	10
4.1.2 Diskontinuierliche Strahlablenkung	15
4.2 Untersuchungsobjekt 2: Körper aus Plexiglas	18
4.3 Untersuchungsobjekt 3: Kugeln im Becherglas	20
5. Zusammenfassung	22
Literatur	22

1 Einleitung

Die Elektronenstrahl-Schweißanlage des Institutes für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) der Universität Stuttgart dient üblicherweise zum Schweißen metallischer Objekte im Vakuum. Das zu schweißende Objekt bildet dabei für den magnetisch abgelenkten Elektronenstrahl die Anode. Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf der Anode entsteht neben Wärme auch Röntgenstrahlung. Diese beim Schweißen nebensächliche Strahlung soll im Rahmen des vorliegenden Beitrages zur Röntgen-Tomographie eingesetzt werden. Besonderes Ziel ist es dabei, unter zweckmäßiger Ausnutzung der technischen Gegebenheiten der vorhandenen Schweißanlage mit geringstem Zusatzaufwand vollwertige Röntgen-Tomographie durchzuführen.

Das luftleere Volumen der Schweißanlage ist groß genug, um darin die zur Tomographie erforderliche Messanordnung sowie das zu untersuchende vakuumbeständige Objekt vollständig unterzubringen. Schon allein deshalb genügt ein geringerer Aufwand im Vergleich zur üblichen Elektronenstrahl-Tomographie [Kal00], bei der sich im allgemeinen nicht alle wesentlichen Komponenten im Vakuum befinden. Um darüber hinaus den bestimmungsgemäßen Betrieb der Schweißanlage so wenig wie möglich zu beeinträchtigen, werden auch Signalwege zwischen der tomographischen Messanordnung einerseits und andererseits der Bedien- und Aufzeichnungstechnik außerhalb der Schweißanlage auf das notwendige Minimum beschränkt.

Für die tomographischen Untersuchungen dient ein längs angeschliffener Wolfram-Zylinder als Anode, wobei die zylindrische Form die Wärmeableitung begünstigt. Der Elektronenstrahl wird entlang dieser Anode periodisch linear (sägezahnförmig) abgelenkt und erzeugt somit bei seinem Auftreffen auf der Anode eine entsprechend bewegte punktförmige Röntgenquelle bzw. – zeitunabhängig betrachtet – ein Kontinuum solcher Quellen. Die Steuerung des Elektronenstrahls gestattet neben der kontinuierlichen auch eine diskontinuierliche Strahlführung und damit eine definierte Anzahl einzelner Quellen. Aufgrund der Bewegung der Quelle genügt ein einziger Detektor zum Erfassen der Röntgenstrahlung, nachdem diese das Untersuchungsobjekt durchdrungen hat und dabei abgeschwächt worden ist. Gewöhnlich geht die Röntgen-Tomographie genau entgegengesetzt vor. Dann stehen nämlich einer einzigen Strahlungsquelle viele Detektoren gegenüber, welche meistens linear oder bogenförmig angeordnet sind [WB95]. Entsprechend viele Messgrößen werden also erfasst.

Die beiden genannten Versionen der Röntgen-Tomographie sind insofern äquivalent, als die Projektionsstrahlen zwischen den Quellen und dem Detektor oder zwischen der Quelle und den Detektoren stets einen Fächer bilden. Innerhalb dieses Projektionsfächers muss sich das zu untersuchende Objekt befinden. Zur Rekonstruktion eines Bildes der Schnittfläche, in welcher der Projektionsfächer das Objekt durchschneidet, wird das tomographische Verfahren der gefilterten Rückprojektion [Kak88] vorgesehen. Dieses Verfahren verlangt eine relative Drehung von 360 Grad zwischen dem Projektionsfächer und dem Untersuchungsobjekt. Im betrachteten Fall wird das Untersuchungsobjekt gedreht, und zwar mit Hilfe einer kleinen vakuumbeständigen Drehvorrichtung. Diese wird der praktischen Einfachheit halber nicht geregelt, woraufhin jedoch eine gewisse Instationarität der Winkelgeschwindigkeit nicht zu vermeiden ist. Auf die Erfassung des Drehwinkels wie auch einer Signalisierung definierter Winkelpositionen wird aber trotzdem verzichtet. Somit kann also nicht explizit nachgewiesen werden, dass das Untersuchungsobjekt eine Drehung vollendet hat. Ebenfalls wird darauf verzichtet, die Position

des Elektronenstrahls bzw. der von ihm erzeugten Röntgenquelle messtechnisch zu erfassen.

Aus der Schweißanlage gelangt nunmehr nur noch eine einzige Größe nach außen, nämlich die Messgröße des Detektors. Folglich muss die tomographisch relevante Information vollständig aus dieser einen Größe gewonnen werden. Wie die Messgröße dahingehend aufbereitet wird, ist Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages. Das zur tomographischen Bildrekonstruktion vorgesehene Verfahren der gefilterten Rückprojektion wird als bekannt vorausgesetzt.

Praktisch untersucht werden insgesamt drei Objekte: ein Körper aus Aluminium, ein geometrisch identischer Körper aus Plexiglas und eine lose Schüttung von Glas- und Keramikugeln.

2 Die Messanordnung

Die vollständig im Vakuum der Schweißanlage untergebrachte Messanordnung besteht aus, vgl. Bild 2.1,

- einer horizontalen zylindrischen, längs angeschliffenen Wolfram-Anode für den Elektronenstrahl zur Erzeugung der Röntgenstrahlung,
- einem CdZnTe-Detektor (aktives Volumen $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$, bleiummantelt) für die Röntgenstrahlung und
- einer Drehvorrichtung (Drehteller, Gleichstrommotor und Getriebe, eine Umdrehung in etwa 40 s) für die zu untersuchenden Objekte.

Der Elektronenstrahl, welcher im konkreten Fall für 150 kV und 1,9 mA mit einer Periode von etwa 0,1 s abgelenkt wird, erzeugt eine Röntgenquelle von etwa 0,3 mm Durchmesser. Demgegenüber ist der Detektor mit mehreren Millimetern wirksamer Fläche ziemlich groß. Deshalb wird im Interesse einer hohen Auflösung bei der Bildrekonstruktion das zu untersuchende Objekt nahe an die Quelle gebracht. Dies bietet den zusätzlichen Vorteil, dass das Untersuchungsobjekt vergleichsweise groß sein darf, da es sich vollständig im Projektionsfächer befinden muss. Die Untersuchungsobjekte selbst werden erst bei ihrer praktischen Verwendung im Abschnitt 4 näher betrachtet.

Bei der Röntgen-Tomographie sind die Detektoren üblicherweise mit Kollimatoren versehen, um Streustrahlung zu unterdrücken und somit die Richtwirkung der Detektoren zu verbessern. Bei den nachfolgenden Experimenten darf eine Kollimation des Detektors die Erfassung des Projektionsfächers nicht beeinträchtigen und deshalb vorzugsweise senkrecht zum Projektionsfächer, d.h. in vertikaler Richtung wirken. Der verwendete Bleimantel des Detektors ist entsprechend ausgelegt.

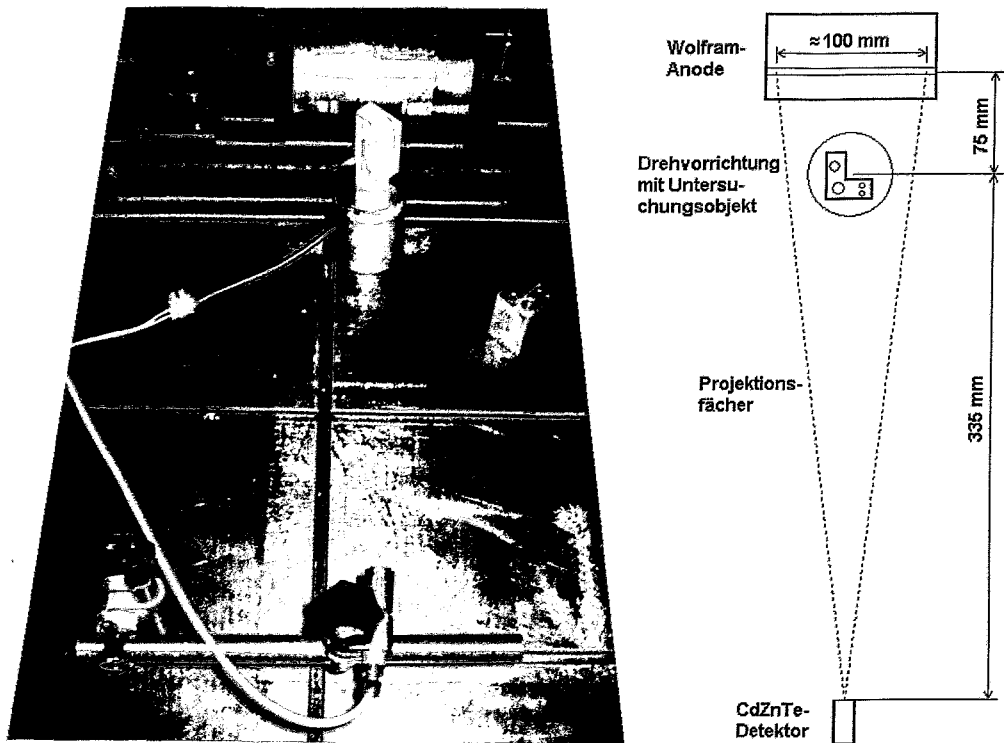


Bild 2-1: Die Messanordnung, bestehend aus Anode, Detektor und Drehvorrichtung mit Untersuchungsobjekt, links real, rechts schematisch

3 Probleme aufgrund eingeschränkter messtechnischer Bedingungen

Die vom Elektronenstrahl erzeugte Röntgenquelle wird nach einer sägezahnförmigen Funktion mit einer Periode von 0,1 s abgelenkt, entweder kontinuierlich, so wie dies im Bild 3-1 dargestellt ist, oder diskontinuierlich. Letzteres wird nur im Abschnitt 4.1.2 benötigt und deshalb erst dort genauer betrachtet.

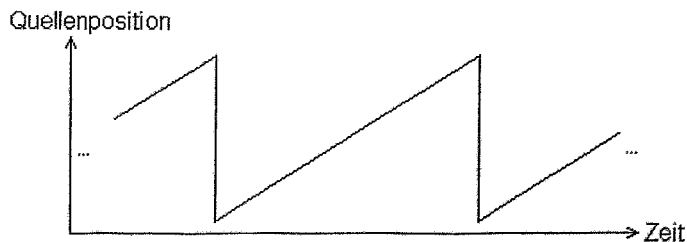


Bild 3-1: Kontinuierliche Strahlableitung (schematisch)

Der von der bewegten Quelle zum feststehenden Detektor gerichtete Projektionsstrahl schneidet das Untersuchungsobjekt periodisch und erzeugt deshalb während der Rotation dieses Objektes eine Folge von eindimensionalen Schattenbildern (Projektionen)

des Objektes. Während der Entstehung einer Projektion dreht sich das Objekt zwar um $1/400$ Umdrehung weiter (0.1 s Strahlablenkung/ 40 s Objektdrehung), doch wird die daraus resultierende geringe Verzerrung der Projektion vernachlässigt. Die einzelnen Projektionen werden zeitlich nacheinander gemessen; tomographisch relevant sind nur die ansteigenden Abschnitte in der Ablenkfunktion, s. Bild 3-1, d.h. die langsamen „Hinfläufe“ des Projektionsstrahls. Zur Separation dieser Projektionen werden die steil abfallende Abschnitte in der Ablenkfunktion, d.h. die schnellen „Rückläufe“ des Projektionsstrahls vorgesehen. Während dieser Rückläufe entstehen zwar ebenfalls Projektionen, nämlich seitenverkehrte, doch erscheinen sie praktisch punktuell bzw. auf sehr kurze Zeitintervalle konzentriert. Den Messwerten aus den Rückläufen wird unterstellt, dass sie im Gesamtverlauf der Messgröße deutlich hervortreten und sich deshalb zur Abgrenzung der (relevanten) Projektionen eignen. Die einzelnen Projektionen werden entsprechend ihrer zeitlichen Abfolge zu einem zweidimensionalen Bild, d.h. einem Sinogramm zusammengestellt. Im Sinogramm erscheinen die Absorptions-Schatten der einzelnen Bestandteile des Untersuchungsobjektes in Form sinusförmiger Linien oder Bänder, vgl. Bild 3-2. Der Mittelpunkt jeder Projektion und damit die Mittellinie des Sinogramms muss mit dem Drehpunkt des Untersuchungsobjektes übereinstimmen. Des weiteren setzt die vorgesehene Anwendung des tomographischen Rekonstruktionsverfahrens der gefilterten Rückprojektion voraus, dass das Sinogramm genau eine Umdrehung des Untersuchungsobjektes bzw. den Drehwinkel 360 Grad repräsentiert. Das Bild 3-2 deutet ein korrektes Sinogramm schematisch an. Nur aus einem derartigen Sinogramm kann ein Schnittbild des untersuchten Objektes rekonstruiert werden. Demgegenüber ist unter den vorliegenden messtechnischen Bedingungen mit verschiedenen Verzerrungen und Deformationen des Sinogramms zu rechnen. Sie werden nachfolgend schrittweise eingeführt und später praktisch in umgekehrter Reihenfolge beseitigt.



Bild 3-2: Sinogramm schematisch

Die Position des Elektronenstrahls und damit der Röntgenquelle wird bei der vorliegenden Versuchsanordnung nicht erfasst bzw. gemessen und kann deshalb nur im Voraus grob abgeschätzt werden. Dadurch ist insbesondere die Mitte der Strecke, welche die Röntgenquelle auf der Anode zurücklegt, nicht genau bekannt. Folglich ist nicht sichergestellt, dass sich die Drehachse des Untersuchungsobjektes in der Mitte des Projektionsfächers befindet. Das (Roh-)Sinogramm kann deshalb gegenüber dem Drehpunkt des Untersuchungsobjektes vertikal verschoben sein, Bild 3-3.

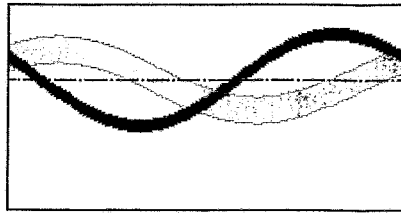


Bild 3-3: Sinogramm vertikal (hier nach oben) verschoben

Die kontinuierliche Messgröße des Detektors wird zeitäquidistant abgetastet, allerdings ohne Synchronisierung mit der Ablenkung der Quelle. Die Ablenkperiode ist deshalb nicht notwendig ein ganzzahliges Vielfaches der Abtastperiode. Folglich kann das Sinogramm zusätzlich zu der genannten vertikalen Verschiebung noch eine lineare vertikale Verzerrung aufweisen, Bild 3-4.

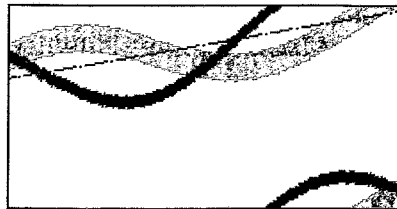


Bild 3-4: Sinogramm vertikal verschoben und verzerrt

Schließlich ist aufgrund der Tatsache, dass die Drehung des Untersuchungsobjektes nicht geregelt wird, mit einer instationären Winkelgeschwindigkeit zu rechnen. Eine solche Instationarität kann nichtlineare vertikale Durchbiegungen im Sinogramm bewirken, wie dies beispielsweise im Bild 3-5 stark übertrieben dargestellt ist.



Bild 3-5: Sinogramm vertikal verschoben, verzerrt und nichtlinear durchgebogen

Verzerrungen und Deformationen des Sinogramms, wie sie im Bild 3-5 angedeutet sind, sollen so wie bereits erwähnt mit Hilfe der Messwerte aus den Strahlrückläufen bereinigt werden. Diese Messwerte erscheinen im Sinogramm als Kette von Punkten bzw. als (Rücklauf-)Linie. Wenngleich die genaue Lage des Projektionsfächers nicht genau bekannt ist, so kann doch angenommen werden, dass sich die Rücklauf-Linie außerhalb des Schattens des Untersuchungsobjektes befindet und deshalb leicht zu isolieren ist. Eine mögliche Rücklauf-Linie wird zu der Darstellung aus Bild 3-5 hinzugefügt, Bild 3-6.

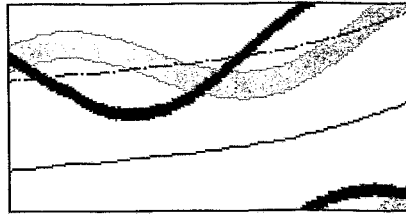


Bild 3-6: Verzerrtes und deformiertes Roh-Sinogramm mit hinzugefügter Rücklauf-Linie

Infolge der fehlenden Synchronität zwischen der Ablenkperiode der Quelle und der Abtastperiode der Messgröße sowie durch die instationäre Drehung des Untersuchungsobjektes unterliegt die Bildung eines Roh-Sinogramms gemäß Bild 3-6 der praktischen Schwierigkeit, dass die Anzahl der zu einer Projektion gehörenden Messwerte im Voraus nicht genau bekannt ist. Aus diesem Grund wird vorgesehen, die Messgröße zunächst in gleichlange Abschnitte einer geeignet erscheinenden Messwertanzahl zu unterteilen und diese Anzahl so lange zu variieren, und ggf. zusätzlich den Anfangszeitpunktes in der Messgröße zu variieren, bis die Rücklauf-Linie innerhalb des Sinogramm-Fensters als stetiger Kurvenzug erscheint.

Abhängig von den jeweiligen Positionen der Stützstellen bei der Abtastung der Messgröße kann es praktisch vorkommen, dass die Rücklauf-Linie stellenweise unterbrochen oder auch breiter als ein Punkt bzw. ein Messwert ist. Deswegen soll die Rücklauf-Linie geeignet approximiert werden. Zur Schätzung der Rücklauf-Linie wird als Ansatz das Ausgleichspolynom n-ten Grades [Teu96]

$$\begin{aligned}
 y &= a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \\
 &= (x^n \ x^{n-1} \ \dots \ x \ 1)(a_n \ a_{n-1} \ \dots \ a_1 \ a_0)^T \\
 &= (x^n \ x^{n-1} \ \dots \ x \ 1)\underline{a}
 \end{aligned} \tag{1}$$

gewählt, wobei x die Abszisse des Sinogramms (Nummer der Projektion: $x = 1, 2, 3, \dots$), y die Ordinate (Position eines Messwertes innerhalb einer Projektion) und a die gesuchten Parameter bezeichnen; T steht für transponiert. Die verschiedenen y -Positionen (insgesamt m , $m \gg n$), die zu einer Rücklauf-Linie gehören, bilden einen $(m, 1)$ -Vektor \underline{y} . Aus den $(1, n)$ -Zeilenvektoren $(x^n \ x^{n-1} \ \dots \ x \ 1)$ entsteht über die n Projektionen die (m, n) -Matrix

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 4 & 2 & 1 \\ \dots & 27 & 9 & 3 & 1 \\ 64 & 16 & 4 & 1 \\ \vdots & & & & \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Damit geht (1) über in

$$\underline{y} = X\underline{a}. \tag{3}$$

Nach (3) ist der Fehlervektor

$$\underline{\epsilon} = \underline{y} - X\underline{a}. \quad (4)$$

Die einzelnen Fehler werden noch mit denjenigen Messwerten w_1, w_2, \dots, w_m gewichtet, die zur Rücklauf-Linie gehören bzw. die im Sinogramm die Koordinaten $(\underline{x}, \underline{y})$ haben. Diese Werte bilden eine (m, m) -Diagonalmatrix

$$W = \begin{pmatrix} w_1 & & & 0 \\ & w_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & w_m \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Der Parametervektor \underline{a} wird durch Minimierung der quadratischen Fehler geschätzt:

$$(W\underline{\epsilon})^T (W\underline{\epsilon}) = \underline{\epsilon}^T W^2 \underline{\epsilon} = \underset{\underline{a}}{\text{Min}} \quad (6)$$

Aus (6), (4) resultiert die Schätzformel

$$\underline{a} = (X^T W^2 X)^{-1} X^T W^2 \underline{y}. \quad (7)$$

Anhand der geschätzten der Rücklauf-Linie kann das Roh-Sinogramm entzerrt und in eine Form wie im Bild 3-3 gebracht werden. Zur anschließend noch erforderlichen vertikalen Korrektur des Sinogramms dient ein Symmetrie-Kriterium (siehe unten).

Weil die Dauer einer Umdrehung des Untersuchungsobjektes nicht erfasst wird, das Verfahren der gefilterten Rückprojektion aber genau eine Umdrehung voraussetzt, wird vorsichtshalber über etwas mehr als eine Umdrehung gemessen und das daraufhin etwas zu breite Sinogramm später abgeschnitten (siehe unten).

Die Vorgehensweise zur Erzeugung und Bereinigung des Sinogramms wird im Abschnitt 4.1.1 anhand eines konkreten Untersuchungsobjektes ausführlich behandelt.

4 Tomographische Bildrekonstruktion

4.1 Untersuchungsobjekt 1: Körper aus Aluminium

Untersucht wird ein mit Löchern versehener Körper aus Aluminium. Draufsicht und Maße dieses Körpers gehen aus Bild 4.1-1 hervor; seine Höhe von 5 cm ist im weiteren ohne Bedeutung.

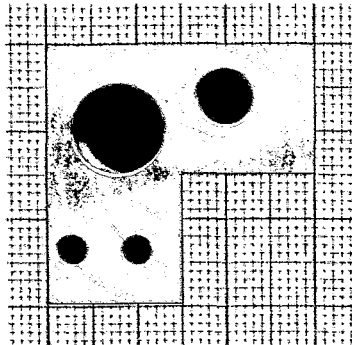


Bild 4.1-1: Aluminium-Körper auf Millimeterpapier

Bei diesem Untersuchungsobjekt wird zwischen der kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen, d.h. schrittweisen Ablenkung des Projektionsstrahls unterschieden.

4.1.1 Kontinuierliche Strahlableitung

Die ursprünglich kontinuierliche Messgröße des Detektors wird zeitäquidistant abgetastet und liegt daher zur Weiterverarbeitung nur quasi-kontinuierlich vor; die Abtastperiode beträgt etwa 5 ms. Die Abtastwerte der Messgröße sind im Bild 4.1.1-1 über eine Zeit von fünf Perioden der Ablenkfunktion (vgl. Bild 3-1) angegeben. Die zu den steil abfallenden Flanken in der Ablenkfunktion und damit zu den Rückläufen des Projektionsstrahls gehörenden einzelnen Messwerte sind markiert. Im Bild gibt es zwar genau einen solchen Wert pro Ablenkperiode, insgesamt fehlen sie aber bei dieser speziellen Messung zuweilen.

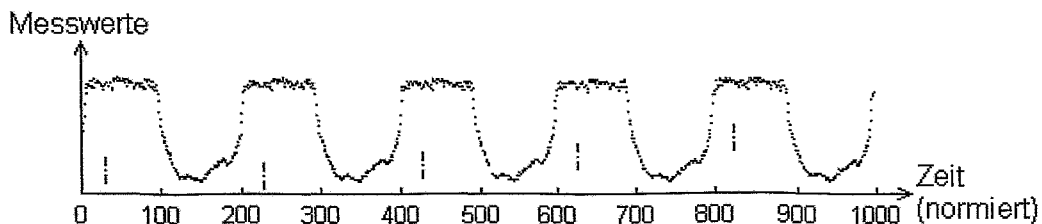


Bild 4.1.1-1: Die Messwerte (Abtastwerte der Messgröße), dargestellt über fünf Perioden der Ablenkfunktion; die zu den Strahlrückläufen gehörenden Werte sind markiert (---). Die Zeit ist auf die Abtastperiode normiert, weswegen die Abszisse die Messwerte zählt.

Infolge der Abtastung der Messgröße umfassen die einzelnen Perioden der Ablenkfunktion rund 200 Messwerte ($0,1\text{s}$ Ablenkperiode/ $0,005\text{ s}$ Abtastperiode = 200). Nach diesem ganzzahligen Abstandsmaß wird die Messgröße von einem geeigneten Anfangspunkt ausgehend in gleichlange Abschnitte unterteilt. Diese Abschnitte werden zu einem Roh-Sinogramm zusammengestellt, Bild 4.1.1-2¹. Weil zu einer Ablenkperiode des Strahls tatsächlich eine ungerade Anzahl von Abtastperioden der Messgröße gehört, wobei diese Anzahl zusätzlich noch leicht variiert, erscheint dieses Sinogramm verzerrt und deformiert, vgl. Bild 3-4. Die Messgröße wird insgesamt über etwa 500 Perioden der Ablenkfunktion erfasst. Dies entspricht etwas mehr als einer Umdrehung des Untersuchungsobjektes.

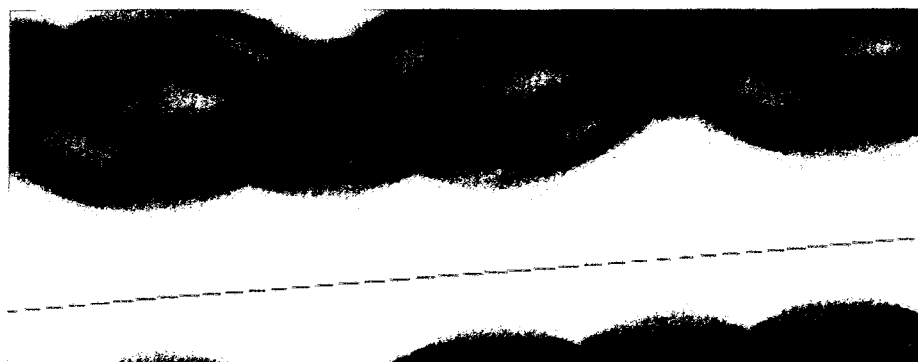


Bild 4.1.1-2: Aus einer zeitäquidanten Zerlegung der Messgröße entstandene Roh-Form eines Sinogramms

Im Bild 4.1.1-2 sind die für ein Sinogramm typischen, von der Rotation des Untersuchungsobjektes hervorgerufenen sinusförmigen Schwingungen zu erkennen. Zudem hebt sich die Rücklauf-Linie des Projektionsstrahls deutlich hervor, vgl. Bild 3-6; sie ist mehrfach unterbrochen ($m = 413$ Punkte). Ein relativ schwach ausgeprägtes schräges Streifenmuster stammt aus einer 50-Hertz-Störung der Messgröße. Auf ein nachträgliches Ausfiltern dieser Störung wird verzichtet, weil dies den Nutzsignalanteil beeinträchtigen würde, denn die Frequenzbereiche von Nutz- und Störsignal überlappen sich.

Für die Rücklauf-Linie im Bild 4.1.1-2 ergibt sich, nachdem sie mit Hilfe eines Schwellwertes vom Untergrund abgetrennt worden ist, nach (7) die Parameterschätzung

$$\begin{aligned} a_0 &= 30,8 \\ a_1 &= 0,0886 \\ a_2 &= 0,0000554 \\ a_3 &= -0,000000076; \end{aligned}$$

¹ Vor ihrer Weiterverarbeitung werden die Messwerte normiert und logarithmiert. Zur Normierung dienen die oberen Plateaus im Messgrößenverlauf, d.h. die Messwerte außerhalb des Bereiches der Strahlungsabsorption. Diese Maßnahme ist ein allgemeiner Bestandteil der Absorptions-Tomographie und wird deshalb hier ohne nähere Betrachtung vorgenommen.

Terme höheren Grades sind vernachlässigbar klein. Der quadratische und der kubische Parameter sind zwar auch relativ klein, trotzdem tragen sie zur Beschreibung der Rücklauf-Linie und damit letztlich zur Qualität des rekonstruierten Objektbildes noch nachweisbar bei. Die Schätzfunktion gemäß (1) ist im Bild 4.1.1-3 dargestellt.

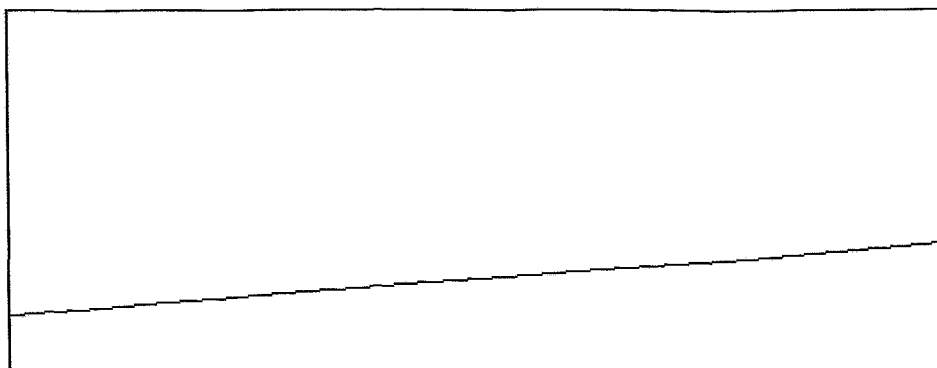


Bild 4.1.1-3: Schätzfunktion der Rücklauf-Linie

Derjenige Anteil des Roh-Sinogramms im Bild 4.1.1-2, welcher sich oberhalb der gefundenen Schätzfunktion befindet, wird nun nach unten verschoben, woraufhin die Rücklauf-Linie am oberen Rand des Roh-Sinogramms erscheint, Bild 4.1.1-4. Diese Linie wird dann abgeschnitten.

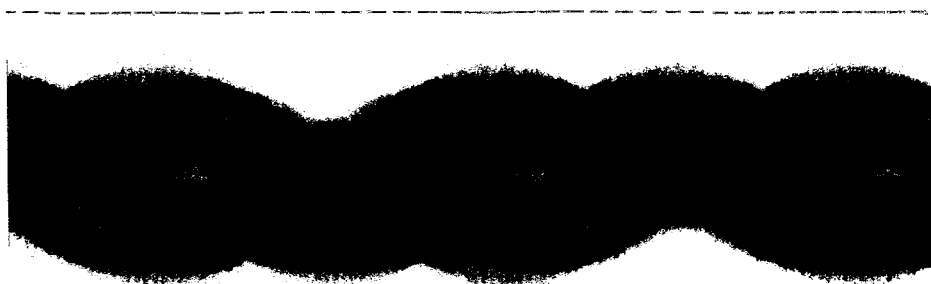


Bild 4.1.1-4: Vertikal entzerrtes Roh-Sinogramm

Die Breite des Roh-Sinogramms entspricht immernoch mehr als einer Umdrehung des Untersuchungsobjektes und muss deshalb auf 360 Grad begrenzt werden. Um die betreffende Breite festlegen zu können, wird ein Fenster mit den ersten 50 Projektionen über das gesamte Roh-Sinogramm geschoben, s. Bild 4.1.1-5, und dabei der Differenzbetrag gebildet. Die entstehende winkelabhängige Differenzfunktion, Bild 4.1.1-6, hat ein ausgeprägtes lokales Minimum an derjenigen Stelle, wo die erste Umdrehung des Untersuchungsobjektes vollendet ist; diese Stelle ist im Bild 4.1.1-6 hervorgehoben.

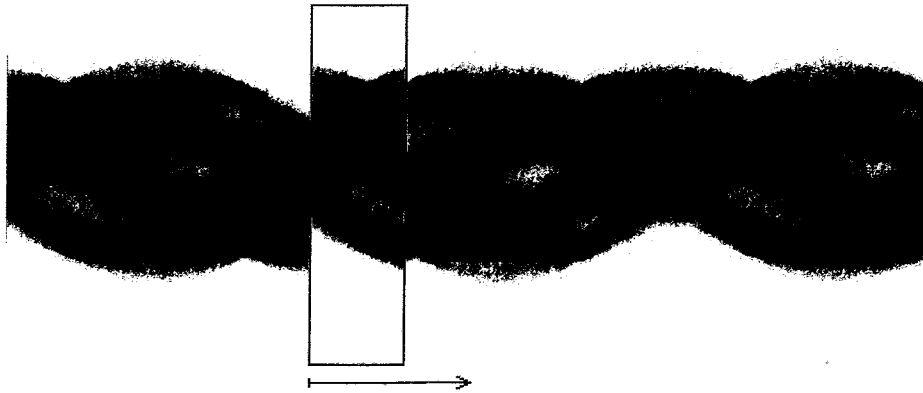


Bild 4.1.1-5: Zur Abgrenzung der ersten Umdrehung des Untersuchungsobjektes

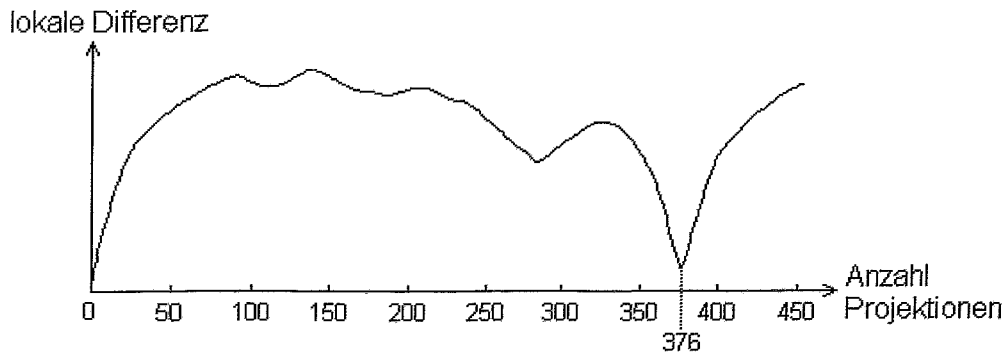


Bild 4.1.1-6: Differenz zwischen den ersten 50 Projektionen aus Bild 4.1.1-5 und einem gleichbreiten, innerhalb des Roh-Sinogramms verschobenen Fenster. Das markierte Minimum der Differenzfunktion bezeichnet in guter Näherung das Ende der ersten Umdrehung des Untersuchungsobjektes.

Das bisher etwa 500 Projektionen breite Roh-Sinogramm wird auf die benötigte Breite von 376 Projektionen beschnitten, Bild 4.1.1-7.

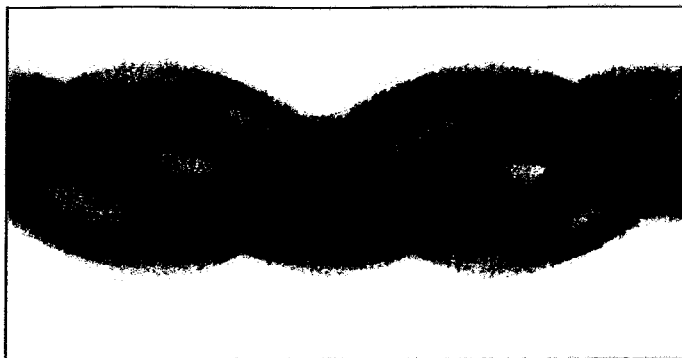


Bild 4.1.1-7: Horizontal korrigiertes Roh-Sinogramm

Um im Roh-Sinogramm auch die vertikale Verschiebung (vgl. Bild 3-3) zu beseitigen, wird das Bild 4.1.1-7 in vertikaler Ausdehnung so beschnitten, dass die beiden nicht zum Objekt gehörenden (hellen) Flächen wenigstens annähernd gleich groß bzw. symmetrisch sind. Dazu wird zweckmäßigerweise der Schatten des Untersuchungsobjektes vom Störuntergrund abgetrennt und eine binärwertige Darstellung vorgenommen, Bild 4.1.1-8.

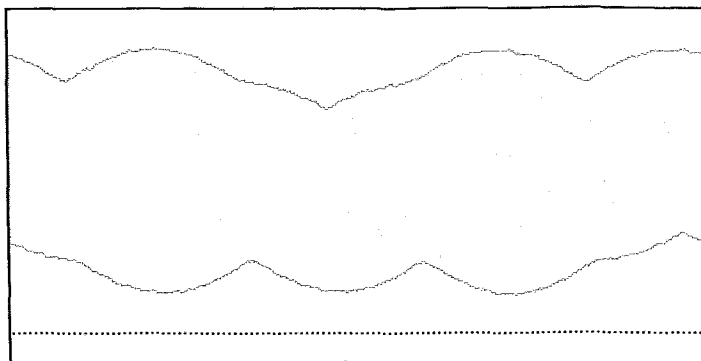


Bild 4.1.1-8: Zur vertikalen Beschneidung des Roh-Sinogramms; der Teil unterhalb der gepunkteten Linie wird abgeschnitten

Aus der vertikalen Beschneidung des Roh-Sinogramms geht schließlich das eigentliche Sinogramm zum Untersuchungsobjekt 1 hervor, Bild 4.1.1-9.

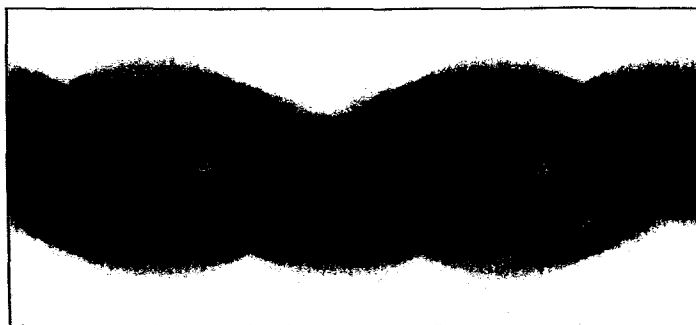


Bild 4.1.1-9: Sinogramm zum Untersuchungsobjekt 1

Aus dem Sinogramm im Bild 4.1.1-9 entsteht nach dem tomographischen Verfahren der gefilterten Rückprojektion die im Bild 4.1.1-10 dargestellte Rekonstruktion zum Untersuchungsobjekt 1.

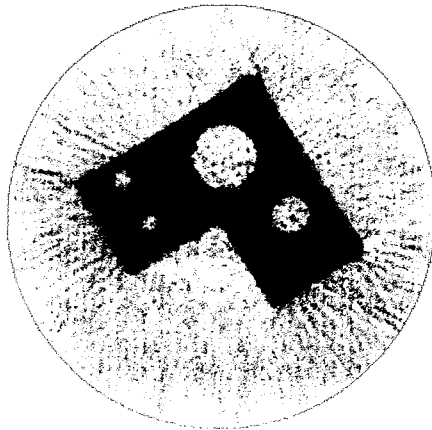


Bild 4.1.1-10: Rekonstruktion zum Untersuchungsobjekt 1

Der Vergleich dieser Rekonstruktion mit der Darstellung des Untersuchungsobjektes 1 im Bild 4.1 lässt erkennen, dass die Rekonstruktion eine Auflösung von mindestens 1 mm erreicht hat. Weil der Durchmesser des Projektionsstrahls ($\geq 0,3$ mm) kaum höhere Auflösungen erwarten lässt, erweisen sich die zur Bereinigung des Roh-Sinogramms getroffenen Maßnahmen hiermit als ausreichend. Dies wiederum zeigt, dass trotz der bestehenden eingeschränkten Messbedingungen noch vollwertige Tomographie möglich ist.

4.1.2 Diskontinuierliche Strahlableitung

Bei diskontinuierlicher Ablenkung der Strahlungsquelle verharrt diese jeweils an einem Punkt und springt dann zum nächsten Punkt. Der bisherige kontinuierliche Fall entspricht aufgrund der Diskretisierung der Messgröße faktisch bereits einer diskontinuierlichen Ablenkung der Quelle, nämlich unter den vorliegenden Bedingungen über insgesamt 200 Punkte. Nachfolgend werden aber über die gesamte Ablenkweite nur 16 Quellpunkte verwendet. Damit gehören bei gleichbleibender Abtastrate zu jedem Quellpunkt $200/16 = 12,5$ bzw. 12 oder 13 Abtastwerte. Die Quelle durchläuft somit die im Bild 4.1.2-1 dargestellte Treppen-Sägezahnfunktion.

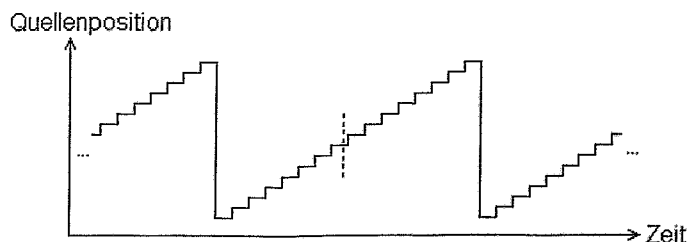


Bild 4.1.2-1: Diskontinuierliche Strahlableitung (schematisch); die vermutete Drehachse des Objektes gehört in etwa zu der gestrichelt markierten Stelle

Die entstehende Messgröße ist im Bild 4.1.2-2 dargestellt.

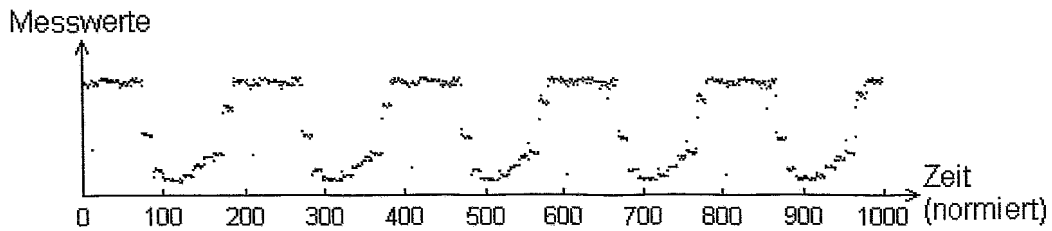


Bild 4.1.2-2: Messwerte im diskontinuierlichen Fall

Aus der Messgröße entsteht das Roh-Sinogramm im Bild 4.1.2-3.

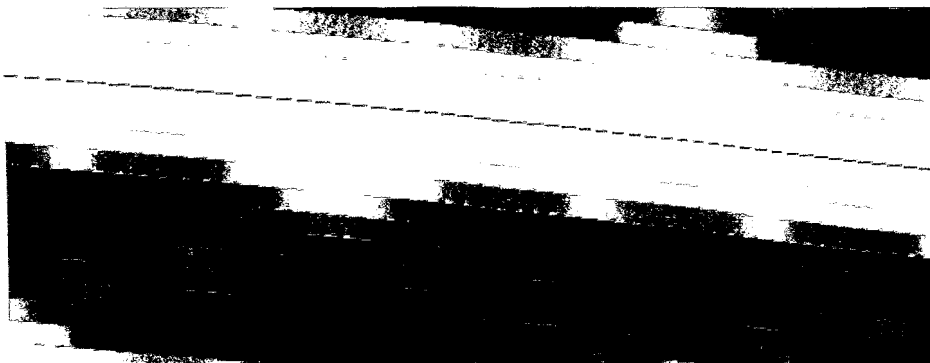


Bild 4.1.2-3: Roh-Sinogramm

Für die Rücklauf-Linie im Bild 4.1.2-3 ergibt sich nach (7) die Parameterschätzung

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 161,2 \\
 a_1 &= -0,0780 \\
 a_2 &= -0,0000621 \\
 a_3 &= 0,000000017.
 \end{aligned}$$

Nach den erforderlichen Bearbeitungen geht aus Bild 4.1.2-3 das Sinogramm im Bild 4.1.2-4 hervor. Die Rekonstruktion des Objektbildes befindet sich im Bild 4.1.2-5.

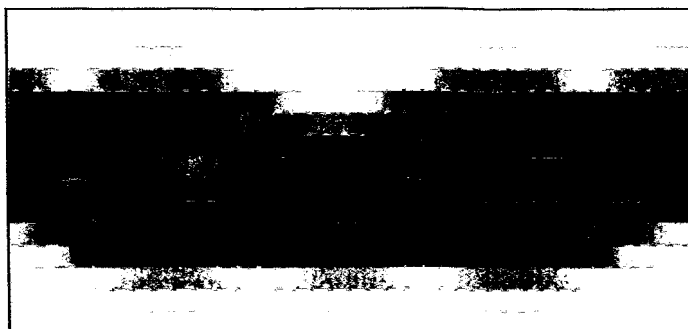


Bild 4.1.2-4: Sinogramm im diskontinuierlichen Fall

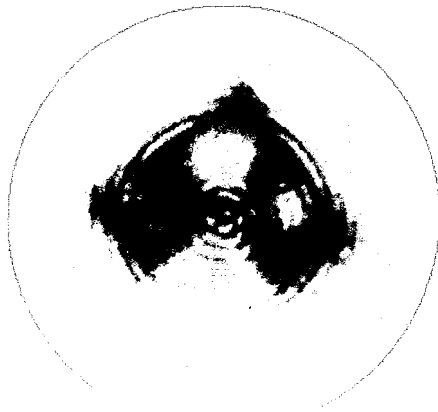


Bild 4.1.2-5: Rekonstruktion zum Untersuchungsobjekt 1 im diskontinuierlichen Fall

Die sprunghaften Übergänge im Sinogramm bewirken konzentrische Ringe im Rekonstruktionsbild. Da etwa 10 Ringe sichtbar sind, hat sich offenbar jeder Sprung aus dem Sinogramm separat abgebildet. Dies kann nur daran liegen, dass sich die Drehachse des Untersuchungsobjektes außerhalb der Mitte einer Stufe der Ablenk-Treppenfunktion befindet. Andernfalls würden sich je zwei Ringe zu einem einzigen, intensiveren Ring überlagern, so dass insgesamt nur etwa 5 Ringe sichtbar wären. Die annähernd gleichen Abstände zwischen den Ringen im Bild 4.1.2-5 weisen darauf hin, dass sich die Drehachse des Untersuchungsobjektes ziemlich genau bei einem Dreiviertel der Breite einer Stufe der Ablenk-Treppenfunktion befindet, im Bild 4.1.2-4 gestrichelt markiert. Trotz der groben Diskretisierung der Strahlableitung bzw. wenigen Quellpositionen ist das Untersuchungsobjekt im Rekonstruktionsbild noch vergleichsweise deutlich erkennbar. Nach Experimenten mit 32 und 64 Quellpositionen (hier nicht dargestellt) ist ein signifikanter Qualitätsverlust im Rekonstruktionsbild gegenüber dem Fall der kontinuierlichen Strahlableitung, vgl. Bild 4.1.1-10, erst bei weniger als 32 Quellpositionen zu verzeichnen.

4.2 Untersuchungsobjekt 2: Körper aus Plexiglas

Untersucht wird ein mit dem Untersuchungsobjekt 1 baugleicher Körper aus Plexiglas, Bild 4.2-1.

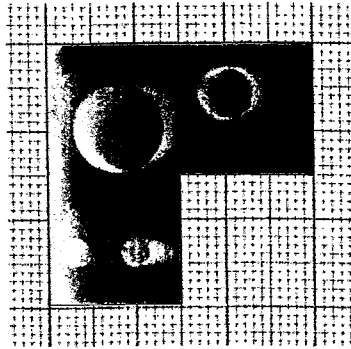


Bild 4.2-1: Plexiglas-Körper auf Millimeterpapier

Dazu gehörende Messwerte sind im Bild 4.2-2 dargestellt.

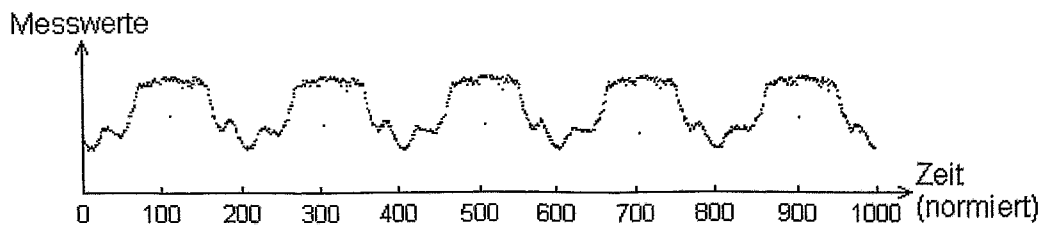


Bild 4.2-2: Messwerte

Der Vergleich zwischen den Bildern 4.2-2 und 4.1.1-1 macht deutlich, dass die Absorption des Projektionsstrahls in Plexiglas deutlich geringer als in Aluminium ist. Aus den Messwerten entsteht das Roh-Sinogramm im Bild 4.2-3.

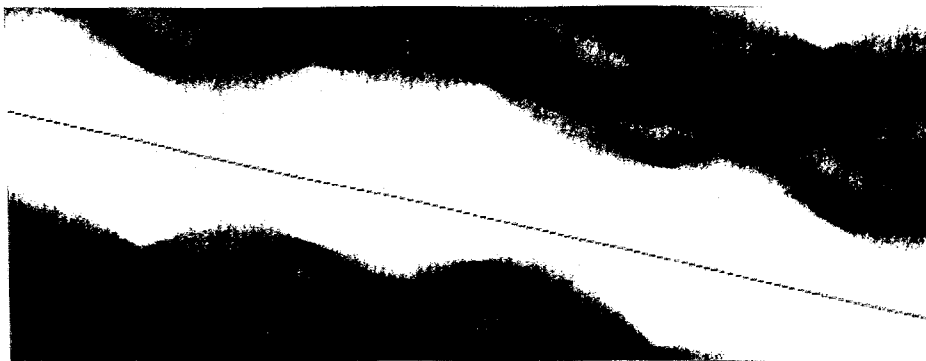


Bild 4.2-3: Roh-Sinogramm

Für die Rücklauf-Linie im Bild 4.2-3 ergibt sich nach (7) die Parameterschätzung

$$\begin{aligned}a_0 &= 140,3 \\a_1 &= -0,225 \\a_2 &= -0,0000192 \\a_3 &= 0,000000012.\end{aligned}$$

Nach den erforderlichen Bearbeitungen geht aus Bild 4.2-3 das Sinogramm im Bild 4.2-4 hervor. Die Rekonstruktion des Objektbildes befindet sich im Bild 4.2-5.

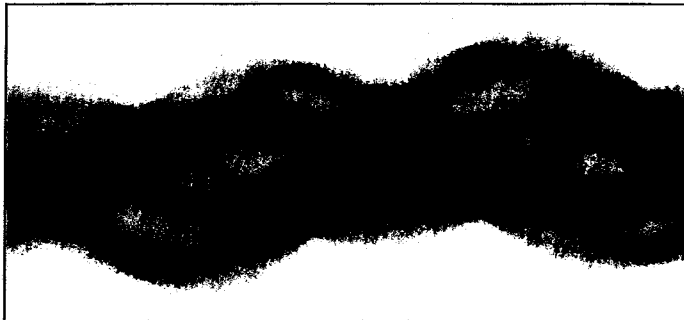


Bild 4.2-4: Sinogramm

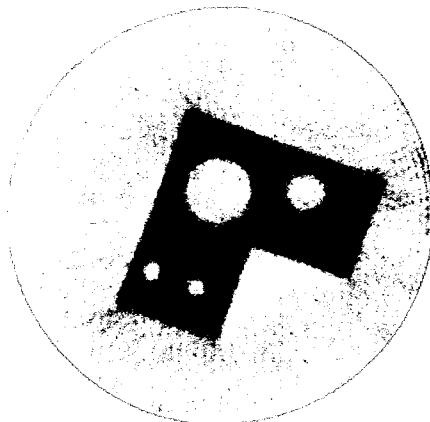


Bild 4.2-5: Rekonstruktion zum Untersuchungsobjekt 2

Die gegenüber dem Aluminiumkörper etwas geringere Qualität dieses Rekonstruktionsbildes, vgl. Bild 4.1.1-10, liegt im wesentlichen an der geringeren Strahlabsorption im Plexiglakörper, der dadurch geringeren Modulation der Messgröße und des folglich relativ größeren Einflusses von Störsignalen sowie von Quantisierungsfehlern.

4.3 Untersuchungsobjekt 3: Kugeln im Becherglas

Untersucht werden Glas- und Keramikugeln unterschiedlichen Durchmessers, die sich ungeordnet in einem Becherglas befinden, Bild 4.3-1.

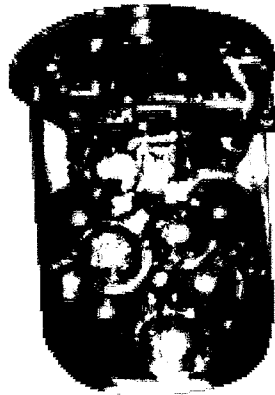


Bild 4.3-1: Becherglas mit Glas- und Keramikugeln

Dazu gehörende Messwerte sind im Bild 4.3-2 dargestellt.

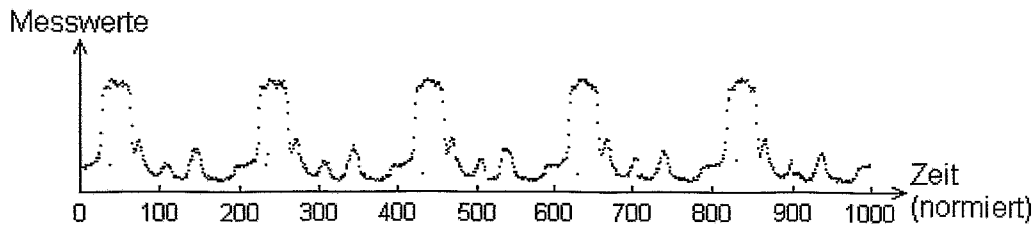


Bild 4.3-2: Messwerte

Aus den Messwerten entsteht das Roh-Sinogramm im Bild 4.3-3.

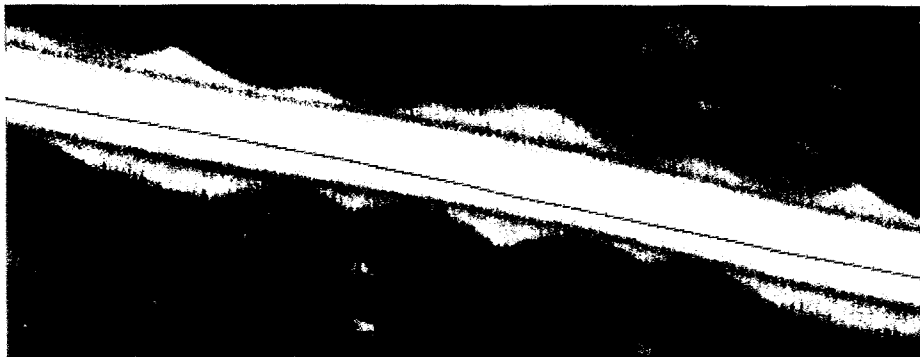


Bild 4.3-3: Roh-Sinogramm

Die Rücklauf-Linie im Bild 4.3-3 ist deutlich stärker nichtlinear verzerrt als in den bisherigen Fällen. Entsprechend ergibt sich für die Rücklauf-Linie nach (7) eine Parameterschätzung mit relativ großen Werten für den quadratischen und kubischen Term:

$$\begin{aligned}a_0 &= 145,0 \\a_1 &= -0,152 \\a_2 &= -0,000205 \\a_3 &= 0,000000225.\end{aligned}$$

Nach den erforderlichen Bearbeitungen geht aus Bild 3.3-3 das Sinogramm im Bild 4.3-4 hervor. Das rekonstruierte Objektbild befindet sich im Bild 4.3-5.

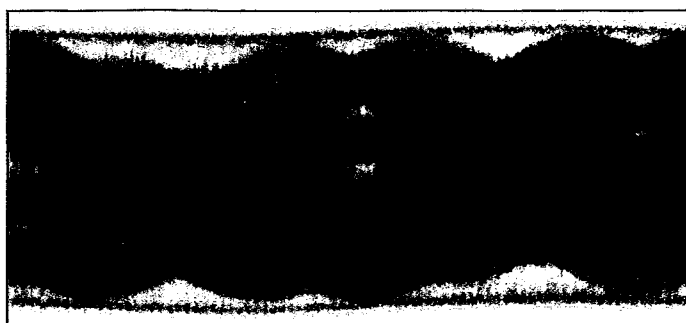


Bild 4.3-4: Sinogramm

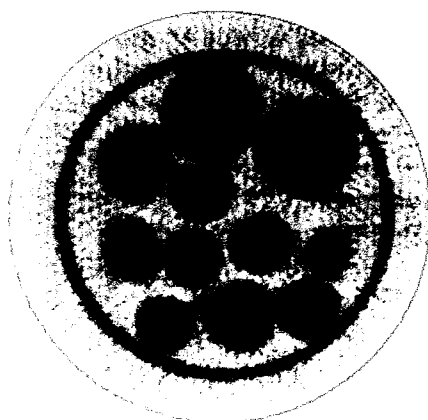


Bild 4.3-5: Rekonstruktion zum Untersuchungsobjekt 3

Die kurzen senkrechten Striche im Bild 4.3-4 bedeuten zufällige Störanteile unbekannter Herkunft in der Messgröße. Im Sinogramm treten die Schattenbilder der verschiedenen Glaskugeln recht deutlich hervor. Der obere und untere Rand im Sinogramm markieren das Becherglas, welches die Kugeln umgibt. Die leichte Welligkeit dieses Randes zeigt an, dass sich die Bechermittelachse geringfügig neben der Drehachse befindet.

In der Rekonstruktion im Bild 4.3-5 erscheinen manche Kugelschnitte vergleichsweise scharf begrenzt, während andere deutlich unschärfere Ränder haben. Grund dafür ist die ungeordnete Kugelschüttung, infolge welcher der Projektionsstrahl einige Kugeln nur seitlich erfasst oder nur berührt. Wegen der endlichen Strahldicke sind die Durchmesser der betreffenden Kugelschnitte von vorn herein (geometrisch bedingt) unscharf. Die unterschiedlichen Helligkeiten der rekonstruierten Kugelschnitte sind auf das unterschiedliche Material der Kugeln (Glas oder Keramik) zurückzuführen; gemessen an der Helligkeit des Becherglases sind die Glaskugeln deutlich von den Keramikugeln unterscheidbar. Die Dicke der Becherwand ist offensichtlich nicht homogen, denn die rekonstruierte Schnittlinie des Bechers ist rechts oben etwas schmaler als links unten.

5. Zusammenfassung

Experimentell wurde gezeigt, wie eine vorhandene Elektronenstrahl-Schweißanlage mit äußerst geringem technischen Zusatzaufwand zur Röntgen-Tomographie eingesetzt werden kann. Das zur tomographischen Bildrekonstruktion benötigte Sinogramm wird dabei allein aus der Messgröße des einen verwendeten Röntgen-Detektors gewonnen. Eine besondere Schwierigkeit ist dabei die korrekte Separation der in der Messgröße zeitlich nacheinander erscheinenden Projektionen des Untersuchungsobjektes. Zu dieser Separation werden die schnellen Rückläufe des Projektionsstrahls herangezogen. Diese Rückläufe heben sich in der Messgröße hinreichend deutlich hervor und erscheinen zeitlich annähernd punktuell. Die betreffenden Messwerte bilden im ursprünglichen Sinogramm, welches zunächst in verzerrter und deformierter Form vorliegt, eine Linie. Mit Hilfe einer Polynom-Approximation wird diese Linie zu einer waagerechten Geraden korrigiert und damit gleichzeitig das Sinogramm entzerrt. Des Weiteren wird das Sinogramm nach zugeschnittenen Kriterien horizontal (in der Anzahl der Projektionen) begrenzt und vertikal (innerhalb der einzelnen Projektionen) symmetrisch ausgerichtet. Aus dem aufbereiteten Sinogramm wird nach dem Verfahren der gefilterten Rückprojektion ein Schnittbild der Untersuchungsobjektes berechnet. Die dabei erreichte Auflösung von weniger als 1 mm entspricht annähernd der Dicke des Projektionsstrahls und kann deshalb prinzipiell kaum weiter gesteigert werden. Die Maßnahmen zur Aufbereitung des Sinogramms, welche den Schwerpunkt dieses Beitrages darstellen, erweisen sich damit als ausreichend.

Literatur

- [Kak88] Kak, A. C.; Slaney, M.: Principles of Computerised Tomographic Imaging. IEEE Press, New York, 1988.
- [Kal00] Kalender, W. A.: Computerised Tomography. Publicis MCD Verlag, Munich, 2000.
- [Teu96] Teubner-Taschenbuch der Mathematik. B. G. Teubner-Verlag, Leipzig, 1996.
- [WB95] Williams, R. A.; Beck, M. S.: Process Tomography – Principles, Techniques and Applications. Butterworth-Heinemann Ltd., 1995.